

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

CITLIVOST VOZIDEL NA BOČNÍ VÍTR

CROSSWIND SENSITIVITY OF ROAD VEHICLES

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE
PHD THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JAN VANČURA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. VÁCLAV PÍŠTĚK, DrSc.

BRNO 2013

KLÍČOVÁ SLOVA

boční vítr, matematický model vozidla, citlivostní analýza, aerodynamický tunel, měřicí systém

KEYWORDS

crosswind, mathematical model of a vehicle, sensitivity analysis, aerodynamic tunnel, measurement system

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Knihovna FSI VUT v Brně

OBSAH

1	Úvod	4
2	Analýza výchozího stavu	5
3	Cíle práce	6
4	Popis zkoušky CBV	7
4.1	Openloop test.....	7
4.2	Closedloop test.....	8
5	Simulační model	9
5.1	Jednostopý model vozidla	9
5.2	Model aerodynamických sil.....	10
5.3	Model pneumatiky	12
5.4	Kinematika jednostopého modelu	14
5.5	Hodnoticí kritéria	15
6	Parametry simulačního modelu	16
7	Numerická citlivostní analýza	17
8	Validace simulačního modelu.....	20
8.1	Popis vozidla	20
8.2	Měřicí řetězec.....	20
8.3	Měřené konfigurace	22
8.4	Srovnání simulace s výsledky experimentu.....	23
9	Vliv nestacionárních jevů na CBV	24
10	Závěr	27
	Použité informační zdroje	29
	Seznam použitých zkratk a symbolů	30

1 Úvod

Jedním ze základních požadavků na vývoj moderního osobního vozidla je jeho celková bezpečnost, která úzce souvisí se směrovou stabilitou vozidla a jeho řiditelností. Nedílnou součástí vývojového procesu je tak modelování jízdní dynamiky vozidla a provádění technických experimentů, aby výsledný produkt splňoval požadavky kladené na výrobce. Hlavní snahou výrobců je samozřejmě snížit náklady na vývoj vozidla, čehož lze v některých případech dosáhnout využitím matematických modelů vozidla namísto provádění nákladných zkoušek.

Mezi takovéto zkoušky patří také test citlivosti vozidla na boční vítr (dále jen CBV). Tento test je mezi ostatními testy z kategorie směrové stability vozidla méně známý, a málokterý výrobce vozidel jej provádí. Hlavními důvody jsou především nutná výstavba zkušebního polygonu disponujícího dostatečně výkonnými ventilátory pro vznik požadovaného větrného poryvu. Cílem této práce je vytvoření metodiky a výpočetního nástroje, který dokáže ohodnotit CBV ve stádiu vývoje a parametricky posoudit vzájemné vazby, jako jsou aerodynamické charakteristiky, hmotová konfigurace, vlastnosti pneumatik a okolní podmínky při průjezdu vozidla bočním větrem.

2 ANALÝZA VÝCHOZÍHO STAVU

V současném stavu se pro hodnocení CBV používají matematické modely vozidla a experimenty daná normou ISO-12021 [4]. Základními aerodynamickými vstupy pro matematické modely jsou data naměřená v tunelu. Někteří výrobci vozidel se snaží nahradit měření v tunelu s vybočením CFD simulacemi [7], popřípadě počítat i nestacionární změny polohy vozidla vzhledem k výslednému proudu vzduchu. Tyto výpočty jsou však velice náročné na výpočetní čas i hardware [8].

Pro matematické modelování jízdní dynamiky vozidla existuje řada modelů, od jednoduchých jednostopých náhrad až po komplexní prostorové modely multi-body systémů (dále jen MBS) zahrnující kinematiku náprav. Největším nedostatkem těchto modelů z pohledu CBV je nesprávné modelování aerodynamických účinků na vozidlo. Řešením tohoto stavu je sestavení nového modelu obsahujícího vliv aerodynamických sil na jízdní dynamiku vozidla.

Pro řešení dynamiky pohybu vozidla při působení bočního větru lze použít jednostopý model vozidla, a to z důvodu jednoduchosti a malého počtu rovnic potřebných pro řešení. Jak uvádí Hucho [1], podobně i Vlček [2], je možné pro směrové aerodynamické vlastnosti vozu zavést lineární model, kdy funkce silových účinků v závislosti na úhlu náběhu vzduchu je vyjádřena směrnici dané aproximační lineární přímkou. To je však vzhledem k povaze skutečných aerodynamických vlastností vozu nevhodné.

V současném stavu je modelování CBV prováděno např. oddělením *Crosswind Sensitivity Department* španělské společnosti IDIADA Automotive Technology SA [3]. Jejich přístup spočívá v propojení Computational Fluid Dynamics (CFD) s (MBS) simulací. V prvním kroku je nutné sestavit matici aerodynamických charakteristik vozidla v závislosti na poloze vozu vzhledem k směrnici výsledného proudu vzduchu. To je výpočtově (a finančně) velice náročné, jako vhodnější se jeví získat tyto charakteristiky měření v aerodynamickém tunelu. Následným krokem je využití sw. ADAMS Car, do kterého tato data vstupují. V závislosti na poloze vozidla vzhledem k výslednému proudu vzduchu jsou aerodynamická data z CFD matice interpolována a korigují tak vnější silové účinky na vozidlo. Obdobnou metodu lze nalézt v sw. CarSim.

Hlavní nevýhodou tohoto řešení je kvazistatický přístup řešení daného problému. Získaná aerodynamická data odpovídají situaci, kdy se vozidlo pohybuje celým svým objemem v oblasti bočního větru, který má konstantní profil rychlosti. Ve skutečnosti vozidlo projíždí oblastí s nehomogenní rychlostí bočního větru, kde vlivem nestacionárního přetvoření mezní vrstvy na vozidle výsledné silové účinky nabývají jiných hodnot oproti ustálenému stavu. Tento fakt byl jednak experimentálně prokázán na modelu vozidla při průjezdu oblastí bočního větru, kdy dynamická složka aerodynamických sil podstatně převyšovala složku statickou [9], tak i ve speciálním aerodynamickém tunelu vybaveném vibračním ramenem vytvářející harmonický pohyb zdvihu, klopení klonění a stáčení. Technický experiment potvrzuje navýšení aerodynamických sil o dynamickou složku způsobenou pohybem karoserie a současně prokazuje jistou míru hystereze v závislosti na amplitudě a frekvenci pohybu karoserie vzhledem k proudu vzduchu [10]. Tento jev numericky uvádí i Tsubokura [11].

Řešením výše uvedeného je sestavit matematický model obsahující aerodynamické charakteristiky vozu získané měření v aerodynamickém tunelu. Následným provedením citlivostní analýzy na vstupní veličiny modelu identifikovat ty parametry, které mají dominantní vliv na CBV. Pro tyto parametry následně provést sérii měření CBV dle ISO 12021. Oproti normě je nutné měřit profil rychlostního pole ventilátorů vyvolávající boční vítr a současně rozložení tlaku na vybraných bodech vozidla. Porovnáním výsledků simulace, experimentem na zkušebním polygonu a měření v aerodynamickém tunelu lze vyvodit vazbu mezi statickým měření v tunelu a dynamickou změnou aerodynamických sil pro daný profil rychlostního pole větru.

3 CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je vytvoření metodiky a výpočetního nástroje, který dokáže ohodnotit CBV. Výstupy této práce bude možné využít během vývoje vozidla a kontrolovat tak CBV ve stádiu virtuálního prototypu vozidla.

Hlavním cílem je sestavit výpočetní nástroj v prostředí sw. Matlab, který umožní simulovat zkoušku CBV dle ISO 12021. Jedná se tedy o open-loop test bez zásahu řidiče do vlastního manévru s uzamčeným volantem. Vlastní jádro programu bude postaveno na jednostopém modelu vozidla rozšířeného o aerodynamické vlastnosti vozidla. Konkrétní výstupy z programu budou jak časové průběhy stavových veličin popisujících jízdní dynamiku vozidla, tak i kritériální hodnoty, jejichž stanovení bude odpovídat metodice dle výše uvedené ISO normy.

Další významnou částí této práce je stanovení metod k získání vstupů do modelu a provedení komplexní, dvanácti rozměrné citlivostní analýzy vlivu vstupních dat na sledované kritériální veličiny CBV. K tomuto bude použito Response Surface Methodology, jenž je součástí sw. Matlab. Ke stanovení definičního oboru citlivostní analýzy a zpracování n-rozměrné výsledkové matice bude vypracován samostatný software. Výstupem této části práce bude ocenění vlivu jednotlivých parametrů na CBV a následné stanovení požadavků na přesnost měření veškerých vstupů.

Souvisejícím tématem každé nové metodiky, popřípadě matematického modelu je jeho validace. Ta bude provedena měřením dle ISO12021 na polygonu disponujícím ventilátory pro vytvoření větrného poryvu. Vlastní validace modelu bude provedena na více aerodynamických variantách vozidla. Uvedené validační měření současně poslouží i pro validaci výsledků citlivostní analýzy RSM a testování vlastních geometrických opatření snižujících CBV.

Z výsledků měření by mělo být možné nalézt souvislost mezi tlakovým polem na povrchu vozidla a stavovými veličinami popisující jeho jízdní dynamiku.

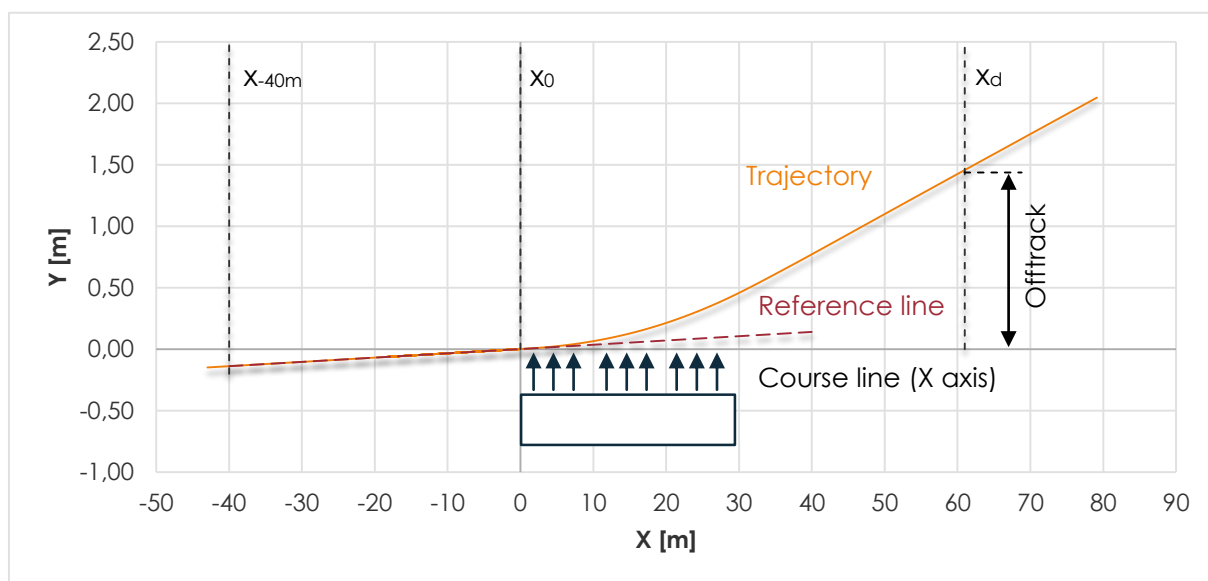
4 POPIS ZKOUŠKY CBV

Zkouška CBV je zaměřená na hodnocení jízdní dynamika vozidla, respektive jeho směrové stability během a bezprostředně po působení bočního větru. Z důvodů maximální možné objektivizace je zkouška rozdělena do dvou skupin - openloop a closedloop test.

4.1 OPENLOOP TEST

Výhodou openloop testu je právě zmíněná vyšší míra objektivizace, jelikož v tomto případě do manévru nezasahuje řidič. Měřené charakteristiky tak popisují pouze aerodynamické a jízdní vlastnosti samotného vozidla. Tento typ testu je také mnohem snazší porovnávat s numerickými modely, právě z důvodů absence zásahu řidiče do samotného manévru. Eliminace zásahu řidiče do samotného manévru je realizována uzamčením volantu během vlastního testu.

Základním principem této zkoušky je průjezd vozidla skrz boční poryv větru vyvolaný řadou ventilátorů. Nejjednodušším hodnotícím kritériem je pak samozřejmě vybočení vozidla v daném čase od původního přímého směru. Tuto hodnotu je možné měřit přímo, nebo ji nepřímo dopočítat z dalších veličin popisující příčný pohyb vozidla. Jak bude ukázáno dále, tato veličina je silně závislá na počátečních podmínkách, které jsou sice normou upraveny, nicméně např. pro validaci numerického modelu je tato veličina značně nevhodná. Základní schéma, podle kterého probíhá zkouška CBV, je zobrazeno na Obr. 1.



Obr. 1 Základní schéma zkoušky CBV

Podmínkou úspěšně provedené zkoušky dle ISO 12021 je, aby vybočení v úseku mezi body x_{-40m} a x_0 nepřesáhlo 2,5% procenta z této vzdálenosti, což odpovídá 1m. Hodnocení CBV na základě vybočení, které může být ovlivněno až 1 m (cca 50% z obvykle měřené hodnoty) je značně nevyhovující. Mnohem vhodnější je použít integrální hodnoty bočního zrychlení a stáčivé rychlosti, která jsou mnohem méně závislé na úhlu mezi Course line a Reference line. Použití kritéria vybočení pro experimentální hodnocení vlivu parametrů vozidla na CBV je naprosto nevhodné a může vést k nesprávným závěrům. Možným řešením tohoto problému je transformace trajektorie o úhel mezi Course line a Reference line, přesto není tato korekce úplně správná.

Měření bočního zrychlení a rychlosti stáčení je poměrně jednoduché s využitím akcelerometru a snímače úhlové rychlosti. Mnohem složitější je však měření vlastního vybočení. Jako nejvhodnější nástroj se jeví použití některého z diferenčních GPS systémů, které dosahují absolutní přesnosti určení polohy do 2 cm. Většina těchto systémů současně obsahuje inerciální platformu umožňující současné měření zrychlení a úhlové rychlosti ve všech třech osách.

ISO 12021 – měřené veličiny					
Povinné			Doplňkové		
rychlost stáčení	$d\psi/dt$	[°/s]	boční výchylka (vybočení)	y	[m]
boční zrychlení	A_y	[m/s ²]	úhel klopení	φ	[°]
úhel natočení volantu	δ_H	[°]	směrová úchylka	β	[°]
podélná rychlost	v_x	[m/s]	boční rychlost	v_y	[m/s]

Tab. 1 Měřené veličiny manévru CBV dle ISO 12021

V Tab. 1 jsou uvedené všechny veličiny, které je nutné, a které se doporučují měřit. Pro přesné měření složek rychlosti vozidla v_x a v_y je možné použít například optických snímačů Correvit. Z těchto signálů je pak při znalosti polohy snímače vzhledem k pevnému bodu vozidla snadné spočítat směrovou úchylku vozidla v těžišti. Nevýhodou použití snímačů Correvit jsou především jejich rozměry, které mohou ovlivnit aerodynamické vlastnosti vozidla. Při použití inerciální GPS platformy tento problém odpadá, současně jsou měřeny všechny povinné i doplňkové veličiny, kromě úhlu natočení volantu. Tato informace je získávána obvykle ze snímače úhlu umístěného na tyči řízení, popřípadě na náboji volantu a slouží primárně pro kontrolu provedení openloop testu, tedy bez zásahu řidiče do řízení. Vlastní realizace zkoušky CBV podle výše uvedeného je popsána v kapitole 8.

4.2 CLOSEDLOOP TEST

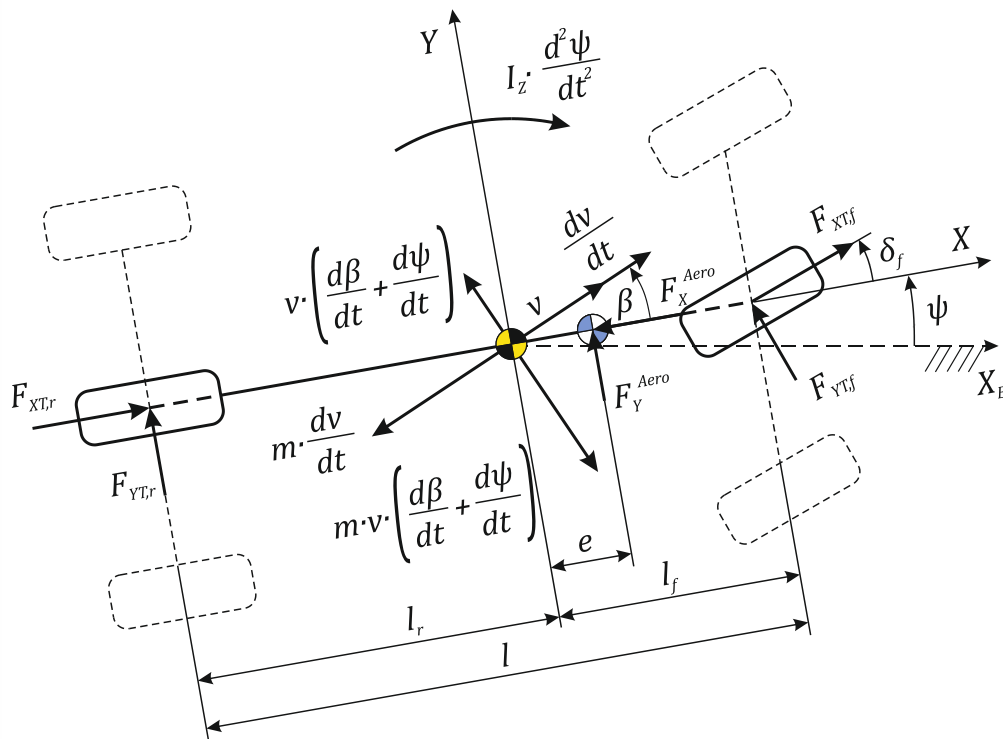
Podstatou closedloop testu je hodnocení chování vozidla v bočním větru, do kterého zasahuje řidič. Tento test je tedy subjektivní a jeho modelování by vyžadovalo buď sestavení modelu řidiče anebo propojení subjektivního hodnocení s některým z měřených objektivních kritérií. Jelikož hlavním cílem je sestavení metodiky, která dokáže posoudit chování samotného vozidla v bočním větru, je closedloop test pro toto spíše nevhodný. Vytvoření metody pro hodnocení CBV v případě closedloop testu by bylo možné provést po sestavní metody openloop testu. Je zřejmé, že v prvním kroku by bylo nutné odladit model samotného vozidla (což je ve shodě s cílem této práce), a až následně by bylo možné provést rozšíření o model řidiče. Největší překážkou hodnocení CBV na základě closedloop testu by pak byla právě zmíněná objektivizace subjektivního hodnocení řidičem.

5 SIMULAČNÍ MODEL

Pro řešení dynamiky pohybu vozidla při působení bočního větru je možné použít jednostopý model vozidla, a to z důvodu jeho jednoduchosti a malého počtu rovnic potřebných pro řešení. V tomto modelu je nutné zahrnout aerodynamická zatížení vyvolaná jak vlastním pohybem vozidla, tak i působením bočního větru.

5.1 JEDNOSTOPÝ MODEL VOZIDLA

Základem pro odvození pohybových rovnic jednostopého modelu vozidla je silová rovnováha uvedená na Obr. 2. Z tohoto schématu je možné popsat silové a momentové účinky působící na vozidlo pro jednotlivé směry.



Obr. 2 Silová rovnováha jednostopého modelu s aerodynamickým zatížením

Pro Obr. 2 tedy platí následující základní soustava rovnic:

$$\begin{aligned}
 \sum F_X: & -m \cdot \frac{dv}{dt} \cdot \cos \beta + m \cdot v \cdot \left(\frac{d\beta}{dt} + \frac{d\psi}{dt} \right) \cdot \sin \beta - F_{YTf} \cdot \sin \delta_f + F_{XTf} \cdot \cos \delta_f + F_{XTr} - F_X^{Aero} = 0 \\
 \sum F_Y: & -m \cdot \frac{dv}{dt} \cdot \sin \beta - m \cdot v \cdot \left(\frac{d\beta}{dt} + \frac{d\psi}{dt} \right) \cdot \cos \beta + F_{YTf} \cdot \cos \delta_f + F_{XTf} \cdot \sin \delta_f + F_{YTr} + F_Y^{Aero} = 0 \quad (1) \\
 \sum M_Z: & -I_z \cdot \frac{d^2\psi}{dt^2} + F_{YTf} \cdot l_f - F_{YTr} \cdot l_r + F_Y^{Aero} \cdot e = 0
 \end{aligned}$$

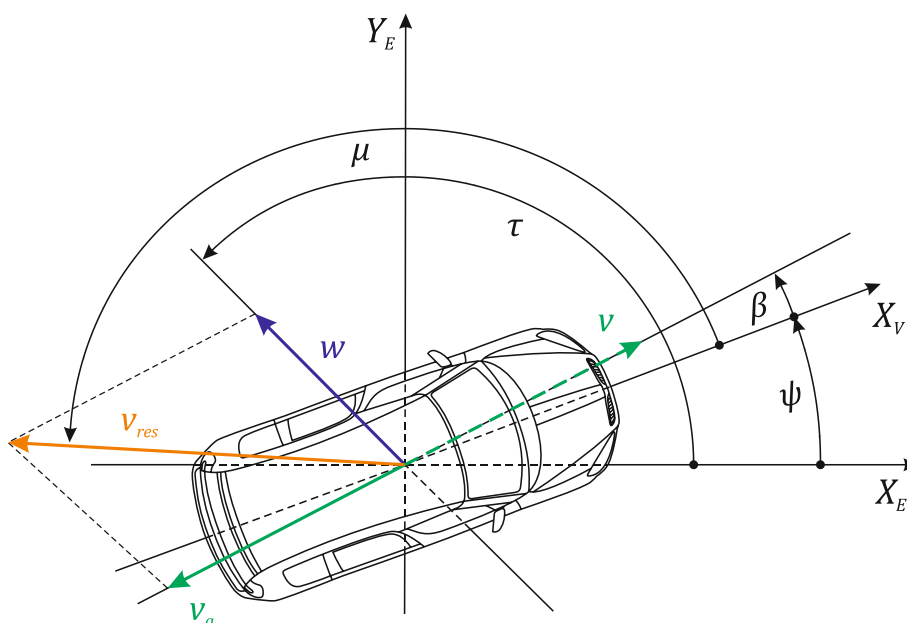
5.2 MODEL AERODYNAMICKÝCH SIL

Doposud byly veškeré aerodynamické účinky větru prezentovány pouze skrze boční sílu F_Y^{Aero} a aerodynamické rameno e . To však pro správnou funkci modelu a následné hodnocení sledovaných kritérií popisující chování vozidla a jeho odezvu na buzení bočním větrem nestačí. Model vozidla je nutné doplnit o model aerodynamických sil.

Modelem aerodynamických sil můžeme rozumět vnější silové zatížení vozidla jako funkci jeho rychlosti, úhlu stáčení a směrové úchylky v těžišti, aktuální rychlosti větru a jeho směru.

Model aerodynamických sil popisuje v tomto případě pouze ty silové účinky, které bezprostředně souvisí se samotným bočním větrem. Jedná se o kvazistatický model nezohledňující dynamickou povahu samotného manévru vjíždění do a z oblasti bočního větru. Této problematice je věnovaná samostatná kapitola této práce. Vliv aerodynamických sil na svislé zatížení vozu (vztlaků), potažmo na velikost směrové úchylky kola není v tomto modelu zahrnuta. Tyto aerodynamické účinky však není možné zanedbat, proto jsou zahrnuty v modelu pneumatiky, jak bude uvedeno dále.

Nejdříve je nutné odvodit závislost výslednice rychlosti proudu vzduchu na rychlosti vozidla, rychlosti větru a natočení vozu. Obecné schéma působení vektoru rychlosti boční větru w na vozidlo jedoucí rychlostí v je znázorněno na Obr. 3.



Obr. 3 Odvození velikosti úhlu natočení vozidla a výslednice proudu vzduchu

S využitím cosinovy věty je podle Obr. 3 možné odvodit velikost výsledného proudu vzduchu v_{res} . To je uvedeno v rovnici (2)

$$v_{\text{res}} = \sqrt{v^2 + w^2 - 2 \cdot v \cdot w \cdot \cos(\tau - \psi - \beta)} \quad (2)$$

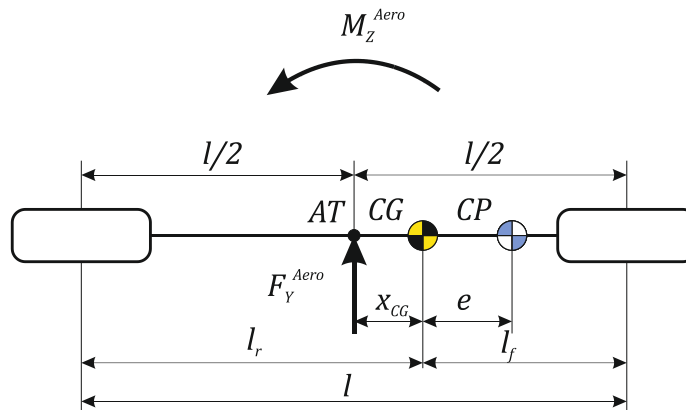
Pro výsledný úhel směru vektoru výsledného proudu vzduchu platí podle sinovy věty rovnice (3).

$$\mu = \arcsin\left(\frac{w}{v_{res}} \cdot \sin(\tau - \psi - \beta)\right) - \beta \quad (3)$$

Pro výsledné aerodynamické silové účinky (závislé na aerodynamických koeficientech získaných v aerodynamickém tunelu, tudíž i v jeho souřadném systému) působící na vozidlo můžeme odvodit rovnice (4).

$$\begin{aligned} F_Y^{AeroAT} &= -S = -q_\infty \cdot c_S \cdot F = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{res}^2 \cdot c_S(\mu) \cdot F \\ M_Z^{AeroAT} &= N = q_\infty \cdot c_N \cdot F \cdot l = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{res}^2 \cdot c_N(\mu) \cdot F \cdot l \end{aligned} \quad (4)$$

Tyto rovnice platí pro souřadný systém aerodynamického tunelu. Pro správnou implementaci do jednostopého modelu vozidla je nutné přepočítat tyto rovnice do těžiště vozidla. To je znázorněno na Obr. 4.



Obr. 4 Vztah mezi aerodynamickým zatížením v souřadném systému AT a CG

Zavedením pojmu relativní vzdálenost těžiště x_{CG}^{rel} od středu aerodynamického tunelu dle rovnice (5) můžeme transformaci silových účinků ze souřadného systému tunelu do těžiště vozidla přepsat do konečného tvaru v rovnici (6).

$$x_{CG}^{rel} = \frac{x_{CG}}{l} = 0,5 - \frac{m_r}{m} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F_Y^{Aero} &= -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{res}^2 \cdot c_S(\mu) \cdot F \\ M_Z^{Aero} &= F_Y^{Aero} \cdot e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{res}^2 \cdot F \cdot l \cdot (c_N(\mu) - c_S(\mu) \cdot x_{CG}^{rel}) \end{aligned} \quad (6)$$

V případě potřeby vyjádřit aerodynamické silové účinky v závislosti na datech získaných z aerodynamického tunelu (očekávaný případ) je možné převést rovnice na tvar, v nichž je hustota

vzduchu vyjádřena v hodnotě dynamického tlaku – viz rovnice (7). Tento způsob je mnohem praktičtější pro propojení standardního formátu dat z AT s numerickou simulací.

$$\begin{aligned} F_Y^{Aero} &= -\frac{q_\infty}{v_{WIND}^2} \cdot F \cdot c_s(\mu) \cdot v_{res}^2 \\ M_Z^{Aero} &= \frac{q_\infty}{v_{WIND}^2} \cdot F \cdot (c_N(\mu) - c_s(\mu) \cdot x_{CG}^{rel}) \cdot l \cdot v_{res}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Vzhledem k tomu, že aerodynamické parametry vozidla mají vliv i na kolmé zatížení pneumatik, je nutné zavést vztah mezi celkovou kolmou silou a vztlakem vozidla – viz rovnice (8)

$$\begin{aligned} F_{zTf} &= \frac{1}{2} \cdot \left(m_f \cdot g - \frac{q_\infty}{v_{WIND}^2} \cdot F \cdot c_{AV}(\mu) \cdot v_{res}^2 \right) \\ F_{zTr} &= \frac{1}{2} \cdot \left(m_r \cdot g - \frac{q_\infty}{v_{WIND}^2} \cdot F \cdot c_{AH}(\mu) \cdot v_{res}^2 \right) \end{aligned} \quad (8)$$

5.3 MODEL PNEUMATIKY

Základním směrovou vlastností pneumatiky je její směrová tuhost C_{α} , která vyjadřuje vztah mezi velikostí boční síly působící ve stopě pneumatiky a její směrovou úchylkou. Tato závislost je nelineární a mění se především s kolmým zatížením pneumatiky. Hodnoty směrové úchyly pneumatiky jsou získávány experimentálně a jsou prokládány pomocí vhodného modelu, nejčastěji Magic Formula Tire Model – MF.

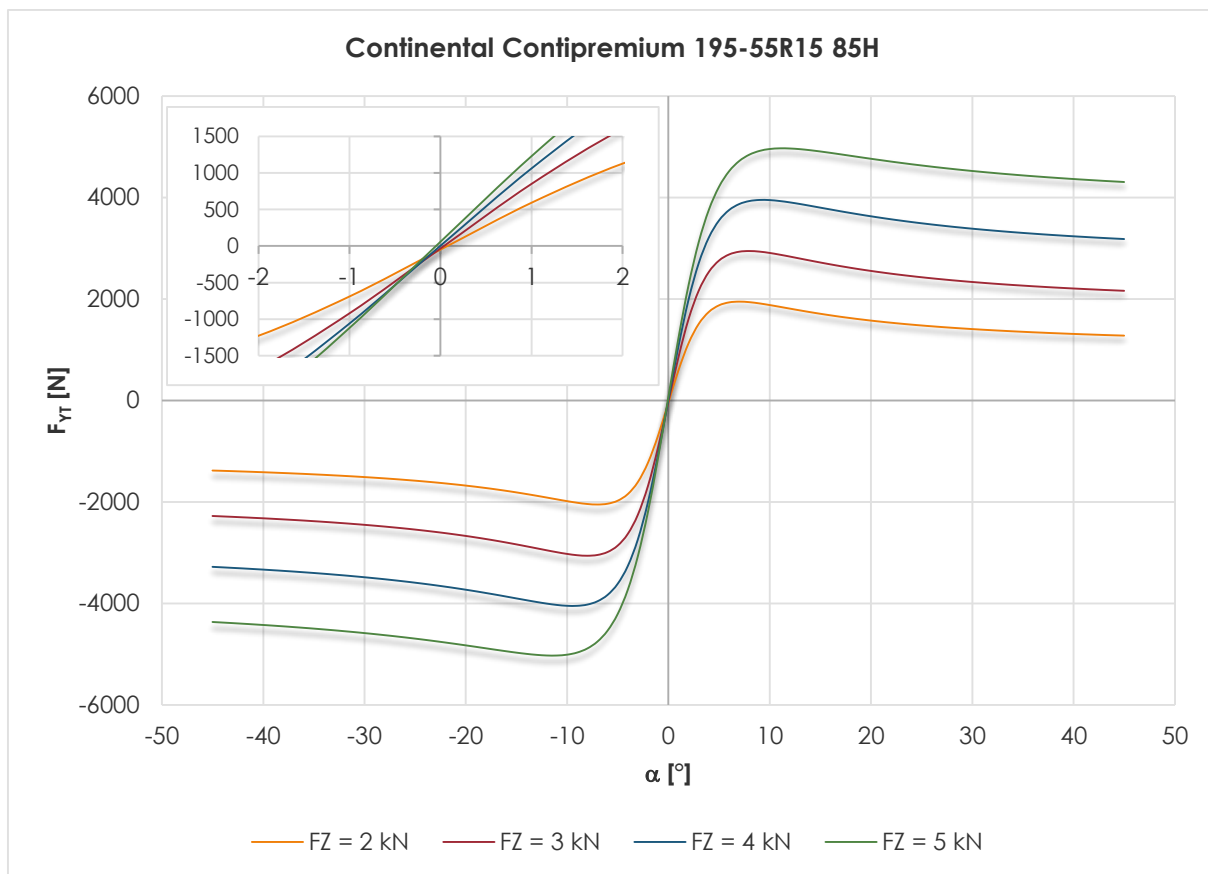
Magic Formula je matematické vyjádření, které umožňuje popsat vztah mezi základními vlastnostmi pneumatiky a jejich vliv na silovou interakci v místě styku pneumatiky s vozovkou. Tento model lze použít pro rovný povrch vozovky, kdy nerovnosti jsou větší jak poloměr kola a frekvence svislého kmitání nepřesahuje 8 Hz. Existují tři základní provozní podmínky, pro které je možné model použít:

- Samostatný podélný skluz kola – Brzdění či akcelerace bez zatáčení
- Samostatný příčný skluz kola – Zatáčení při volně se odvalujícím kole
- Kombinace podélného a příčného skluzu – Brzdění v zatáčce apod.

Manévru CBV tedy odpovídá samostatný příčný skluz kola. Pro samostatný skluz kola je boční síla F_{YT} v místě styku pneumatiky s vozovkou funkcí směrové úchyly α (pro případ příčného skluzu) respektive síla F_{XT} je funkcí podélného skluzu κ . Základní rovnice popisující vztah mezi daným skluzem kola a příslušnou složkou síly je uveden v rovnici (9).

$$Y(x) = D \cdot \cos\left(C \cdot \arctan\left(B \cdot x - E \cdot \left(B \cdot x - \arctan(B \cdot x)\right)\right)\right) \quad (9)$$

Ukázka závislosti boční síly na směrové úchylce pneumatiky Contipremium 195-55R15 85H pro různá zatížení je v Graf 1. Parametry pneumatiky byly získány měřením na zkušební stoličce společnosti Michelin. Výstupem tohoto měření je .tir soubor dle standardu MF 5.2. Uvedené závislosti jsou platné pro nulový odklon kola a tlak pneumatiky 2,6 bar.



Graf 1 Závislost boční síly na směrové úchylce

V oblasti malých směrových úchylek, cca do 2°, lze považovat závislost mezi boční silou a směrovou úchylkou za lineární, velikost boční síly lze tedy vyjádřit podle vztahu (10).

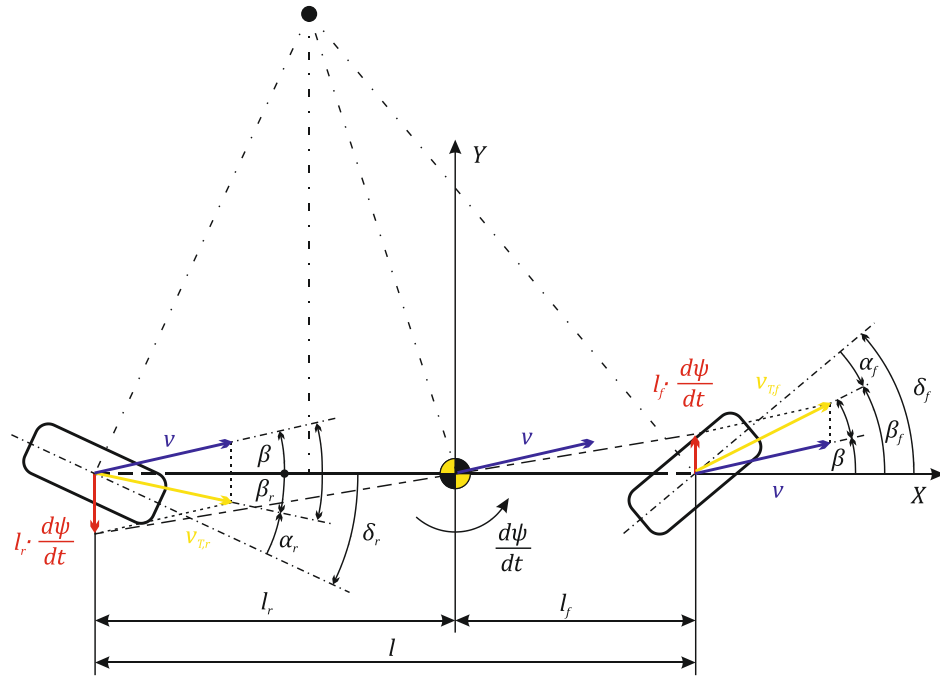
$$F_{YT} = C_{\alpha} \cdot \alpha \quad (10)$$

Směrová tuhost pneumatiky je tedy v oblastech malých úhlů směrové úchylky definována jako derivace boční síly podle směrové úchylky (tečna funkce) dle vztahu (11).

$$C_{\alpha} = \left(\frac{\partial F_{YT}}{\partial \alpha} \right)_{\alpha \rightarrow 0} \quad (11)$$

5.4 KINEMATIKA JEDNOSTOPÉHO MODELU

Aby bylo možné sestavit konečnou podobu pohybových rovnic jednostopého modelu, je nutné popsat závislost směrových úchylek pneumatik jako funkci směrové úchyly vozidla a rychlosti stáčení. Vzájemná souvislost těchto parametrů je patrná z obrázku Obr. 5.



Obr. 5 Kinematika jednostopého modelu

Pro směrové úchyly na kolech přední a zadní nápravy poté platí rovnice (12).

$$\begin{aligned}\alpha_f &= -\beta - \frac{l_f}{v} \cdot \frac{d\psi}{dt} + \delta_f \\ \alpha_r &= -\beta - \frac{l_r}{v} \cdot \frac{d\psi}{dt} + \delta_r\end{aligned}\quad (12)$$

Dosazením předchozích rovnic do základních silové rovnováhy je získána konečná soustava pro řešení CBV.

$$\begin{aligned}\frac{d\beta}{dt} &= \frac{F_{yf}^{Aero} + F_{yr}^{Aero}}{m \cdot v} - \left(\frac{C'_{\alpha f} l_f - C_{\alpha r} l_r}{m \cdot v^2} + 1 \right) \cdot \frac{d\psi}{dt} - \frac{(C'_{\alpha f} + C_{\alpha r}) \cdot \beta}{m \cdot v} \\ \frac{d^2\psi}{dt^2} &= \frac{F_{yf}^{Aero} \cdot l_f - F_{yr}^{Aero} \cdot l_r}{I_z} - \frac{(C'_{\alpha f} \cdot l_f^2 + C_{\alpha r} \cdot l_r^2)}{I_z \cdot v} \cdot \frac{d\psi}{dt} + \frac{(C'_{\alpha f} \cdot l_f - C_{\alpha r} \cdot l_r)}{I_z} \cdot \beta\end{aligned}\quad (13)$$

Řešením soustavy rovnic (13) jsou získány časové průběhy stavových veličin popisující jízdní dynamiku vozidla při manévru CBV.

5.5 HODNOTICÍ KRITÉRIA

Hodnoticí kritéria simulačního modelu odpovídají kritériím popsaným v normě ISO 12021. Jedná se o střední integrální hodnoty rychlosti stáčení, bočního zrychlení a vybočení v daném čase.

Rychlost stáčení je jedna z hodnot získaná přímo numerickým řešením soustavy (13). Hodnota bočního zrychlení (přestože je v soustavě (13) obsažena v součtu bočních sil, není však přímo řešenou veličinou) je dopočítávána ze stavových veličin směrové úchyly a rychlosti stáčení podle rovnice (14). Nutno poznamenat, že se jedná o boční zrychlení v souřadném systému vozidla.

$$A_y = v \cdot \left(\frac{d\beta}{dt} + \frac{d\psi}{dt} \right) \quad (14)$$

Vybočení vozidla v daném čase lze obdobně jako u bočního zrychlení získat z řešených stavových veličin simulačního modelu, konkrétně integrací boční složky rychlosti vozidla. Zde je však nutné provést transformaci do souřadného systému vozovky. Pro vybočení vozidla ve sledovaném čase t pak platí rovnice (15).

$$y_v = \int_0^t v \cdot \sin(\beta + \psi) \cdot dt \quad (15)$$

Integrální hodnoty bočního zrychlení a rychlosti stáčení (dále označovány zkratkou PV podle Pulse Value) se vyhodnocují pouze v oblasti průjezdu bočního větru a jsou tak na počátečních podmínkách závislé minimálně. Střední integrální hodnoty stavových veličin jsou definovány jako integrál příslušné veličiny v mezích poloviny maxima.

Vlastní střední integrální hodnotu lze tedy stanovit nalezením příslušných mezí integrálu dle (16),

$$f(t) = \frac{\max(f(t))}{2} \rightarrow t_1, t_2 \quad (16)$$
$$\Delta t = t_2 - t_1$$

kteří jsou nezbytné pro řešení integrálu příslušné sledované veličiny (17)

$$PV = \frac{\int_{t_1}^{t_2} f(t) \cdot dt}{\Delta t} \quad (17)$$

6 PARAMETRY SIMULAČNÍHO MODELU

Vstupními parametry simulačního modelu se rozumí ty veličiny, které jsou nezbytné pro výpočet kritérií CBV uvedených v kapitole 0. Obecně je lze rozdělit na aerodynamické parametry vozidla, hmotnostní parametry vozidla, parametry pneumatik a vnější parametry. Seznam vstupních parametrů je uveden v Tab. 2.

Skupina	Symbol	Název	Hodnota výchozí konfigurace
Aerodynamické parametry	$c_s(\mu)$	Koeficient boční síly jako funkce natočení	-
	$c_n(\mu)$	Koeficient momentu stáčení jako funkce natočení	-
	$c_{av}(\mu)$	Koeficient boční síly jako funkce natočení	-
	$c_{ah}(\mu)$	Koeficient boční síly jako funkce natočení	-
	F	Čelní plocha vozidla	2,39 m ²
	q_∞	Dynamický tlak	-
	VWIND	Rychlost vzduchu v tunelu	-
Hmotnostní a konstrukční parametry	m_f	Statické zatížení přední nápravy	1003 kg
	m_r	Statické zatížení zadní nápravy	752 kg
	l	Rozvor vozidla	2621 mm
	I_z	Moment setrvačnosti vozidla k ose Z	2703 kg m ²
	C_s	Tuhost řízení	10 kN/rad
	n_k	Závlek kola	40 mm
Parametry pneumatiky	FZNOMIN	Nominální zatížení pneumatiky při měření	3031,2
	LFZ0	Měřítka nominálního zatížení	1
	LKY	Měřítka směrové tuhosti	1
	LGAY	Měřítka odklonu	1
	PKY1	Maximální hodnota poměru boční tuhosti k FZNOMIN	-24,0726
	PKY2	Zatížení při maximální boční tuhosti	2,3543
	PKY3	Změna poměru boční tuhosti k FZNOMIN s odklonem	1,2713
	GAM	Odklon kola	0°
Vnější podmínky	v	Rychlost vozidla	110 km/h
	w	Střední rychlost větru	12 m/s
	w_a	Amplituda větru	0 m/s
	n	Počet ventilátorů	10
	τ	Úhel větru	90°
	t_{ws}	Začátek oblasti bočního větru	1,4 s
	t_{we}	Konec oblasti bočního větru	2,4 s
	t_e	Čas pro hodnocení vybočení	4,0 s

Tab. 2 Vstupní parametry matematického modelu

Jednotlivé vstupní parametry je možné získat měřením anebo přímo z CAD modelu. Parametry, které byly získány vlastním měřením, jsou doplněny o hodnotu relativní chyby, pomocí které je možné stanovit celkovou relativní chybu modelu.

7 NUMERICKÁ CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Aby bylo možné řídit CBV již ve stádiu vývoje samotného vozidla je nutné kvantifikovat vliv jednotlivých parametrů na sledovaná kritéria. Parametry s nejvyšší mírou vlivu je vhodné během vývoje zavčas optimalizovat s cílem minimalizovat citlivost na boční vítr. K tomu slouží numerická citlivostní analýza, kterou je možné využít i pro nalezení celkové relativní chyby modelu způsobené nepřesnostmi ve vstupních hodnotách.

Jelikož je matematický model vozidla založen na soustavě diferenciálních rovnic (13) které nemají symbolické řešení, je nutné pro citlivostní analýzu vybrat některou z pokročilých matematických metod. Jako základní se nabízí DOE Full Factorial nebo Response Surface Method (RSM). Vzhledem k velkému počtu vstupních parametrů a době výpočtu byla zvolena RSM. Analýza byla provedena v sw. Matlab.

Response Surface Method se zabývá vztahy mezi několika vstupními proměnnými a jednu nebo více odezvy. Hlavní myšlenkou RSM je použití sady navržených experimentů k získání vztahu mezi vstupy a sledovanou odezvou. Metoda používá kvadratický model, odezva je tedy ve tvaru uvedeném v rovnici (18).

$$y(x) = a_0 + \sum_{i=0}^N a_i x_i + \sum_{i < j}^N a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=0}^N a_{ii} x_i^2 \quad (18)$$

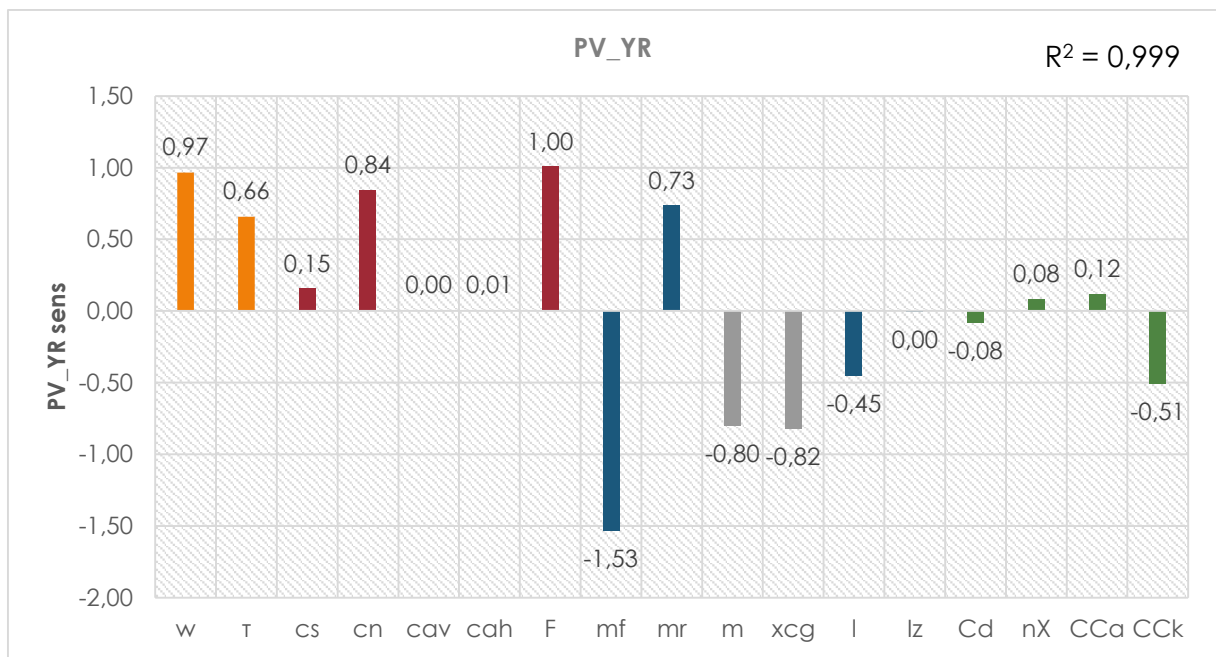
- Pro kombinace změn vybraných vstupních parametrů jsou vypočteny hodnoty kritérií CBV.
- Tyto kombinace vstupních parametrů (faktorů) s odpovídajícími kritérii (odezvami) jsou proloženy plochou druhého řádu, která je následně popsána analytickou rovnicí.
- Derivací této rovnice v bodě odpovídající původnímu nastavení vozidla je určen gradient odezvy.
- Úpravou na jednotkový vektor lze porovnat jednotlivé složky gradientu a tedy i určit citlivost odezvy modelu na vstupní parametry.

Vypočtené hodnoty gradientu představují poměrnou směrnici změny sledované veličiny. Tento lineární předpoklad platí jen v blízkém okolí bodu představující výchozí stav vozidla (stav při zkoušce CBV). Výsledný vliv daného parametru není dán pouze směrnici citlivosti, ale i intervalem, ve kterém je ho možné měnit.

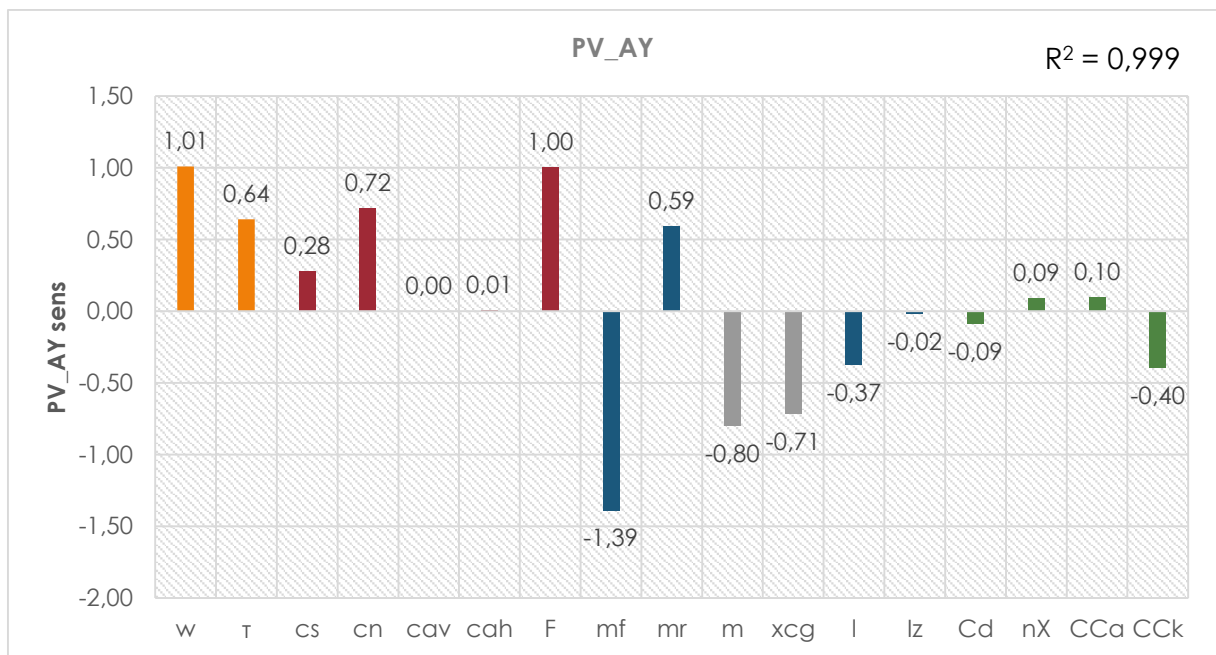
Vlastní řešení citlivostní analýzy je provedeno v normalizovaném tvaru, tzn vstupními hodnotami jsou podíly aktuální hodnoty parametru a výchozí hodnoty, odezvy jsou pak normovány vzhledem k odezvám odpovídajícím výchozím hodnotám všech vstupních parametrů. Výhody tohoto přístupu jsou především v jeho přehlednosti, interpretaci výsledků a možnosti srovnávat parametry mezi sebou a v případě zohlednění rozdílů v základních hodnotách i jednotlivá vozidla.

Celkový počet vyšetřovaných parametrů je 15, což odpovídá 16900 kombinacím (metoda CCD zohledňuje opakování výchozího nastavení). Při standardní době výpočtu 60s pro jednu variantu by celková doba výpočtu přesáhla 280 hodin. Z tohoto důvodu bylo nutné v simulačním nástroji zachovat pouze nezbytné části. Byly odstraněny veškeré výstupy mimo sledovaných hodnotících kritérií, iterační krok byl změněn z 0,001 s na 0,005 a byla provedena paralelizace výpočtu na 4 jádra. Dále byla odstraněna aerodynamická asymetrie vstupních dat, což umožnilo provádět výpočet pouze v jednom směru jízdy. Celková doba výpočtu po těchto úpravách nepřekročila 8 hodin.

Vlastní výsledky citlivostní analýzy jsou uvedeny na Obr. 6 a Obr. 7. Odvozené citlivosti jsou znázorněny šedou barvou.



Obr. 6 Citlivost kritéria PV_YR na vstupní parametry modelu



Obr. 7 Citlivost kritéria PV_AY na vstupní parametry modelu

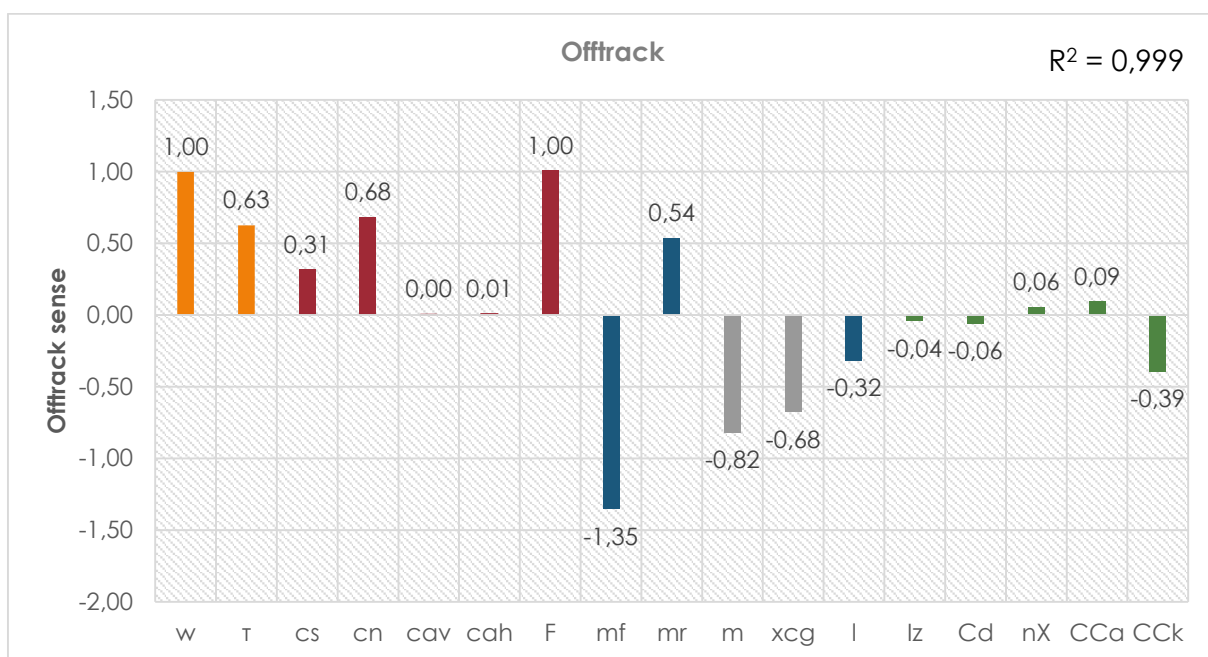
Výsledky citlivostní analýzy jsou pro kritéria PV_YR a PV_AY trendově shodné, v hodnotách se však liší. To koresponduje s předpokladem, že vybraný parametr ovlivňuje stáčení vozidla jinou mírou než pouze samotné bočení. Výborným příkladem tohoto tvrzení je porovnání citlivostí PV_YR sens (reprezentuje stáčení vozidla) a PV_AY sens (reprezentuje bočení vozidla) na aerodynamické parametry momentu stáčení c_n a boční síly c_s .

Významný vliv na výsledné sledované veličiny popisující CBV má samozřejmě rychlost a směr větru, především pak právě rychlost je rozhodujícím vnějším parametrem.

Z aerodynamických parametrů vozidla má nejvyšší vliv čelní plocha F , následuje pak koeficient aerodynamického momentu stáčení c_n a boční síly c_s . Vliv aerodynamických vztlakových sil je velmi slabý. Vysoká citlivost na čelní plochu souvisí s její lineární závislostí k vnějším aerodynamickým silám působících na vozidlo.

Z výsledků citlivostní analýzy parametrů pneumatik vyplývá cca čtyřnásobně větší citlivost na parametr CC_k vzhledem k citlivosti na CC_α . S rostoucím parametrem CC_k (snižuje se směrová tuhost pneumatiky pro dané zatížení) se mírně zhoršuje CBV ve všech sledovaných kritériích. Naopak v případě směrového gradientu CC_k je závislost opačná, s rostoucí velikostí (směrová tuhost pneumatiky je méně citlivá na změnu zatížení) klesá výrazně CBV. Z výše uvedených závěrů lze vyvodit vhodné vlastnosti pneumatiky s ohledem na CBV, ta by měla být maximálně směrově tuhá s minimální degresí při změně zatížení.

Výsledná citlivost sledovaného kritéria Offtrack (vybočení vozidla) na vstupní parametry je uvedena na Obr. 8. Jelikož toto kritérium odpovídá bodové hodnotě vybočení v pevném čase, výsledky citlivosti se mohou značně lišit podle času, ve kterém bylo vybočení počítáno. S rostoucím časem bude převažovat vliv stáčení, což změní výsledné citlivosti.



Obr. 8 Citlivost kritéria Offtrack na vstupní parametry modelu

8 VALIDACE SIMULAČNÍHO MODELU

Validaci simulačního modelu je provedena experimentem dle ISO 12021 na polygonu IDIADA ve Španělsku, který je vybaven generátory bočního větru vhodnými pro měření potřebných validačních veličin. Samotná validace je provedena pro celkem 12 konfigurací vozidla, a to jak se změnami aerodynamických vlastností, hmotnostních tak i parametrů pneumatik. Validace byla provedena na vozidle Škoda Roomster opatřeného celkem třemi měřicími systémy. První systém IMC byl použit pro sběr dat vypovídající o poloze karoserie a bodových odběrech tlaku na povrchu karoserie vozidla. Další měřicí systém byl použit pro měření silových účinků na kolech a poslední měřicí systém byl propojen s přesnou diferenční GPS pro měření parametrů jízdní dynamiky vozidla.

Cílem měření na polygonu IDIADA nebyla pouze samostatná validace matematického modelu, ale také snaha získat data pro jeho případné zpřesnění. Proto bylo měřeno mnohem více veličin (především pak síly a momenty pod koly a tlaky na povrchu vozidla) než je dle normy ISO 12021 nutné.

8.1 POPIS VOZIDLA

Vozidlo použité pro validaci matematického modelu metodiky CBV je SK258 (Škoda Roomster) 1,4l, 51kw TDI. Na vozidle bylo provedeno několik úprav oproti sériovému stavu. Tyto úpravy souvisely jak se zástavbou měřicí techniky, tak i se samotnou validací. Na Obr. 9 je zobrazeno experimentální vozidlo se zalepenými vstupy do motorového prostoru a spár kolem světel a kapoty. Spodní mřížka není zalepená z důvodu chlazení motoru. Vozidlo je vybaveno sériovými koly, které byly použity pouze pro přepravu. Při samotném měření byly použity speciální měřicí kola Kistler Roadyn.



Obr. 9 Experimentální vozidlo - zalepení vstupů do motorového prostoru

8.2 MĚŘICÍ ŘETĚZEC

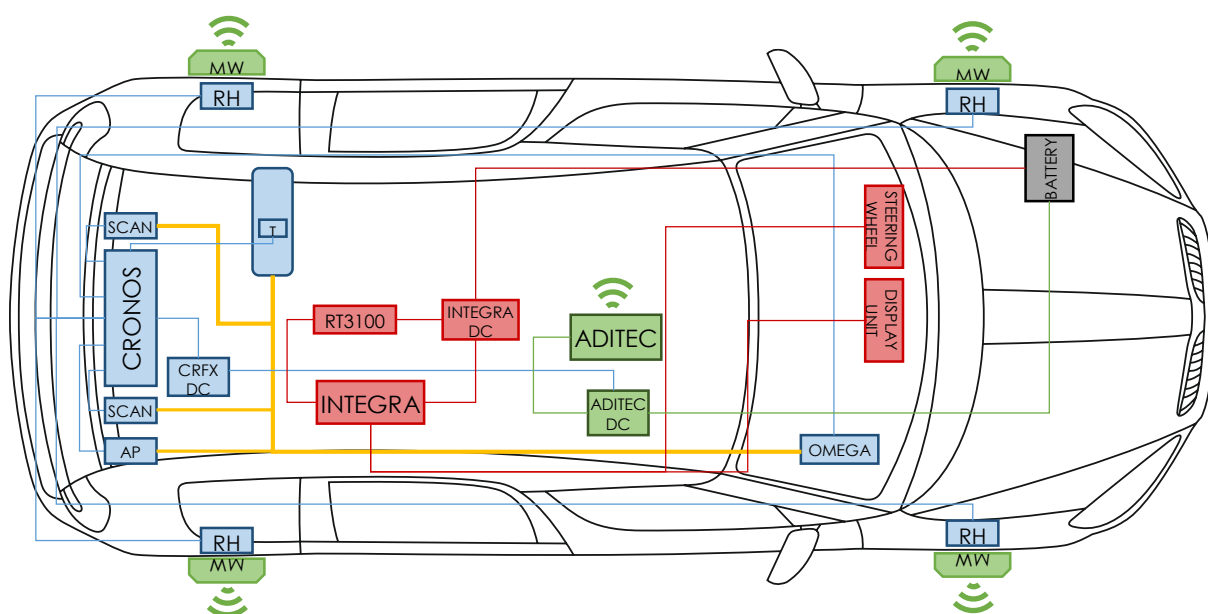
V experimentálním vozidle byly instalovány celkem 3 měřicí řetězce, každý pro danou oblast měření fyzikálních veličin. Hlavním měřicím řetězcem byl systém dodaný do vozidla společností IDIADA, na jejímž polygonu probíhalo validační měření. Tento systém se skládá z měřicí ústředny Multidata Integra, diferenční GPS Oxford RT3000 s integrovanou inerciální platformou a snímače úhlu řízení a

momentu, který je součástí měřicího volantu. Vzorkovací frekvence tohoto systému je 200 Hz, což je pro potřeby měření a následné validace postačující.

Dalším měřicím řetězcem použitým při měření s experimentálním vozidlem byl systém IMC, který se pro tuto aplikaci skládal z ústředny Cronos-CRX, tlakových převodníků Omega a Scanivalve pro měření bodových odběrů tlaku na povrchu karoserie, laserových dálkoměrů Baumer pro určení polohy karoserie, snímače absolutního tlaku v expanzní nádobě jako referenční hodnota pro diferenční tlakové převodníky Omega a Scanivalve. Systém dále obsahoval 4 snímače teploty, především z důvodu přepočtu referenčního tlaku v expanzní nádobě. Stejně jako u systému Multidata Integra i systém IMC zaznamenával data s frekvencí 200 Hz.

Třetím měřicím řetězcem je systém Kistler RoaDyn, jehož hlavní devizou jsou měřicí kola. Pomocí tohoto systému bylo možné získat všech šest silových účinků pro každé kolo v místě styku pneumatiky s vozovkou.

Grafické schéma zapojení s příslušným popisem jednotlivých částí měřicích systémů v experimentálním vozidle je patrné z Obr. 10.



Blok	Snímač	Blok	Snímač
INTEGRA	Ústředna Multidata Integra	CRFX DC	Stabilizovaný zdroj
RT3100	GPS OXT RT3100	RH	Snímač polohy karoserie
STEERING WHEEL	Měřicí volant	OMEGA	Tlakový převodník Omega
DISPLAY UNIT	Zobrazovací jednotka	T	Snímač teploty PT100
INTEGRADC	Stabilizovaný zdroj	ADITEC	Měřicí ústředna Aditec
CRONOS	Ústředna IMC Cronos	MW	Měřicí kolo RoaDyn
SCAN	Tlakový převodník Scanivalve	ADITEC DC	Stabilizovaný zdroj
AP	Absolutní snímač tlaku	BATTERY	Akumulátor vozidla

Obr. 10 Blokové schéma zapojení měřicí techniky v experimentálním vozidle

8.3 MĚŘENÉ KONFIGURACE

Jak bylo uvedeno na začátku této kapitoly, validace modelu byla provedena pro 12 konfigurací vozidla, které lze rozdělit podle typu úpravy do tří skupin: aerodynamické úpravy, hmotnostní a úpravy pneumatik. Pro všechny tyto tři skupiny existuje jediná výchozí konfigurace označená jako BASE.

Vzhledem k tomu, že výsledky validačního měření je při vhodném výběru měřených konfigurací možné použít pro experimentální citlivostní analýzu, bylo nutné předem jednotlivé konfigurace vhodně navrhnout. Obecně bylo cílem provádět změny parametru v jednotlivých konfiguracích izolovaně. Je zřejmé, že v případě aerodynamických parametrů vozidla lze tohoto dosáhnout jen obtížně. Takovéto nastavení, kde by bylo možné izolovaně měnit boční síly a vzlaky, by představovalo samotnou rozsáhlou studii doprovázenou velkým počtem měření v aerodynamickém tunelu, což je z hlediska finanční a časové náročnosti nereálné. Naopak v případě hmotnostních parametrů je možné nalézt takové rozložení hmoty, aby bylo možné měnit izolovaně vždy pouze jeden z vyšetřovaných parametrů – tedy polohu těžiště, celkovou hmotnost a moment setrvačnosti. Jak bude uvedeno dále, takovéto nastavení lze reálně provést, pouze pokud výchozí varianta je hmotnostně upravena proti sériovému stavu, což má za následek zvýšení hmotnosti vozidla a snížení maximální rychlosti vozidla.

Označení	Popis	m	X _{CG}	I _z
BASE	Výchozí nastavení vozidla mimo konfiguraci Pressure	100%	100%	100%
AERO1	Zvýšení aerodynamického momentu stáčení	100%	100%	100%
AERO2	Snížení aerodynamického momentu stáčení	100%	100%	100%
AERO3	Extrémní snížení aerodynamického momentu stáčení	100%	100%	100%
MASS+	Zvýšení hmotnosti vozidla	107%	101%	101%
MASS-	Snížení hmotnosti vozidla	90%	100%	100%
CG+	Posun těžiště k zadní nápravě	100%	105%	101%
CG-	Posun těžiště k přední nápravě	100%	94%	102%
Iz+	Zvýšení momentu setrvačnosti v těžišti	100%	99%	108%
Iz-	Snížení momentu setrvačnosti v těžišti	100%	100%	93%
TIRE	Změna	100%	100%	100%
PRESSURE	Změna tlaku pneumatik	100%	100%	100%

Tab. 3 Přehled měřených konfigurací se změnami hmotnostních parametrů vozidla

Změny aerodynamických vlastností vozidla v konfiguracích Aero1, Aero2 a Aero3 byla provedeny pomocí přídavných aerodynamických prvků tak, aby nebyla změněna čelní plocha vozidla.

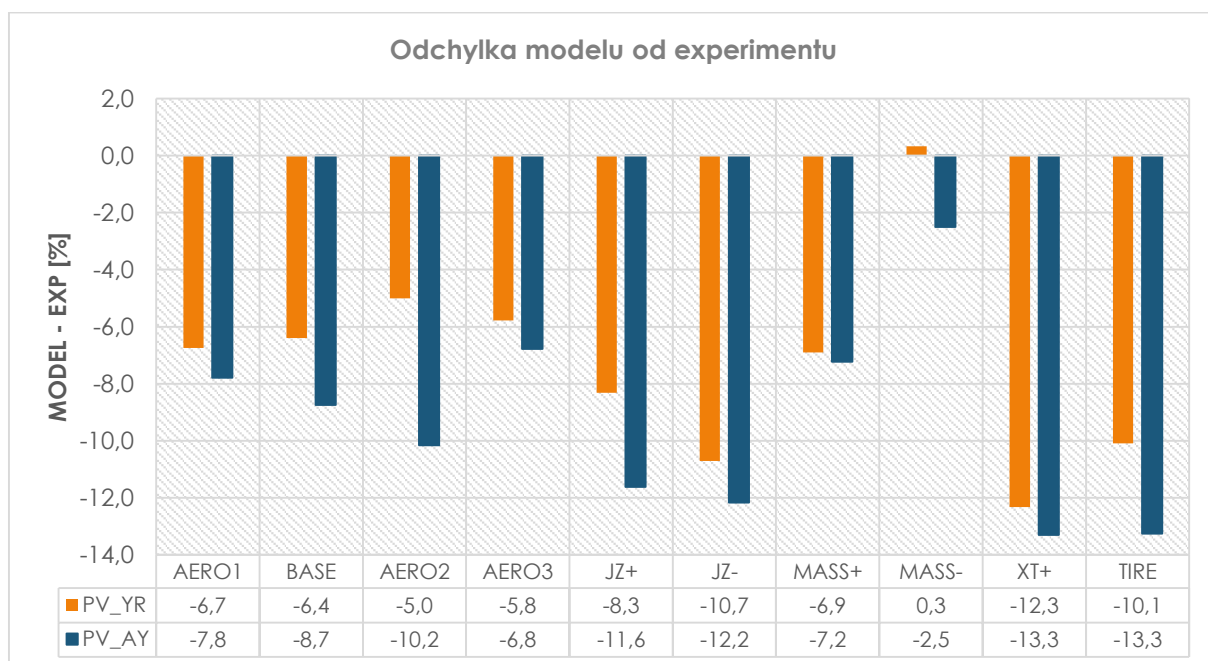
Hmotnostní konfigurace byly realizovány pomocí olovených závaží vhodně rozmístěných ve vozidle. Umístění závaží bylo pro některé konfigurace komplikované, např. nad výztuhou nárazníku. Z tohoto důvodu bylo výhodné ponechat zalepený vstup do motorového prostoru maskou, aby nedocházelo ke změně aerodynamických vlastností vozidla pro různé hmotnosti konfigurace přítomností závaží v oblasti tohoto vstupu vzduchu do motorového prostoru.

8.4 SROVNÁNÍ SIMULACE S VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Srovnání výsledků simulace s měřením bylo provedeno na 10 z 12 měřených variantách. Vyloučeny byly varianty CG- (posun těžiště směrem k zadní nápravě) a PRESSURE (změna tlaku pneumatik). Varianta CG- byla vyřazena z důvodu překročení maximální povolené rychlosti okolního větru, což vedlo k následnému znehodnocení měřených dat. Varianta PRESSURE nebyla pro validaci matematického modelu použita z důvodu absence vlivu tlaku pneumatiky na její směrovou tuhost v matematickém modelu.

Srovnání je provedeno jednak na středních integrálních hodnotách rychlosti stáčení, bočního zrychlení a vybočení vozidla v čase 4s od zahájení jízdního manévru CBV, tak i na samotných časových průbězích stavových veličin. Ty jsou hodnoceny na základě koeficientu korelace časových průběhů bočního zrychlení vozidla a jeho rychlosti stáčení.

Globální přehled odchylky modelu od technického experimentu pro střední integrální hodnotu rychlosti stáčení PV_YR a bočního zrychlení PV_AY je uveden v Graf 2.



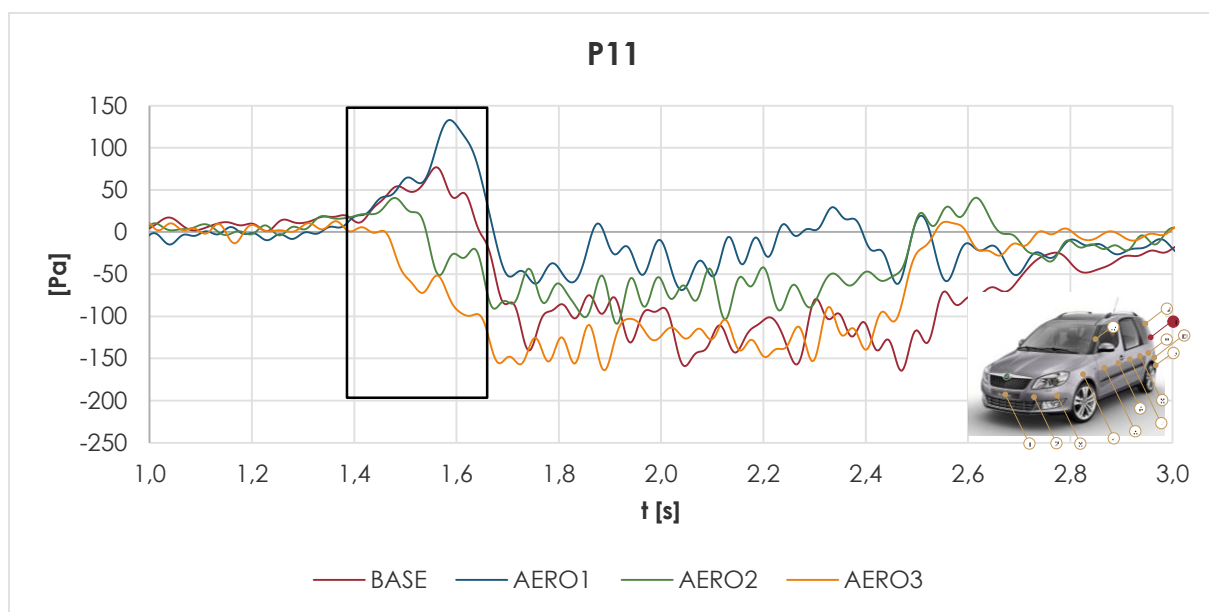
Graf 2 Odchylka modelu od experimentu

Z výsledků validace je patrné podhodnocení modelu CBV oproti experimentu. Aerodynamické varianty dosahují průměrné odchylky od měření pro PV_YR -5,8%, v případě PV_AY je průměrná odchylka -8,2%. Zajímavý je opačný trend ve změně odchylky od modelu pro PV_YR vzhledem k PV_AY. To může být způsobeno nestacionární povahou aerodynamických silových účinků působících na vozidlo.

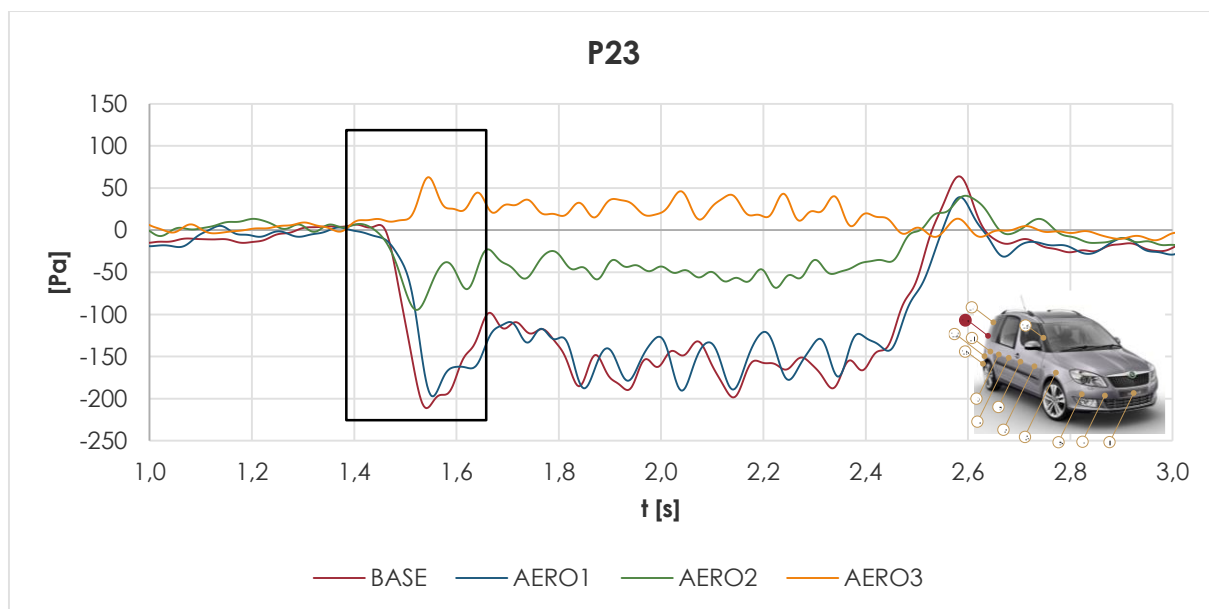
Průměrná odchylka hmotnostních variant a varianty TIRE dosahuje hodnoty -8,1% pro PV_YR a -10% pro PV_AY. Vzhledem k uvedené chybě modelu odpovídající nepřesnosti vstupních parametrů 4,8% lze prohlásit model za přesný.

9 VLIV NESTACIONÁRNÍCH JEVŮ NA CBV

Jak je uvedeno v předchozí kapitole, na karoserii experimentálního vozidla bylo umístěno 27 odběrných míst pro měření tlaku na povrchu vozidla. Průběhy tlaků jsou v oblasti přímé jízdy sesazeny na nulovou hladinu tak, aby bylo možné provést přímé porovnání symetricky umístěných snímačů na levé a pravé straně vozidla.



Graf 3 Průběh tlaku v bodě 11 - na závětrné straně

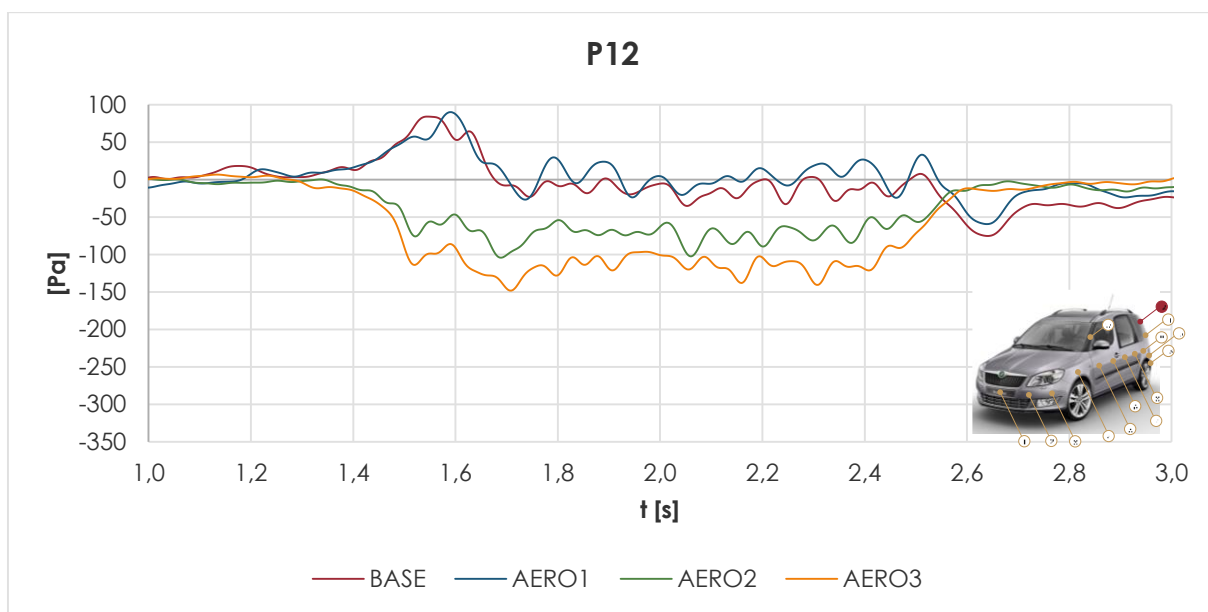


Graf 4 Průběh tlaku v bodě 23 - na návětrné straně

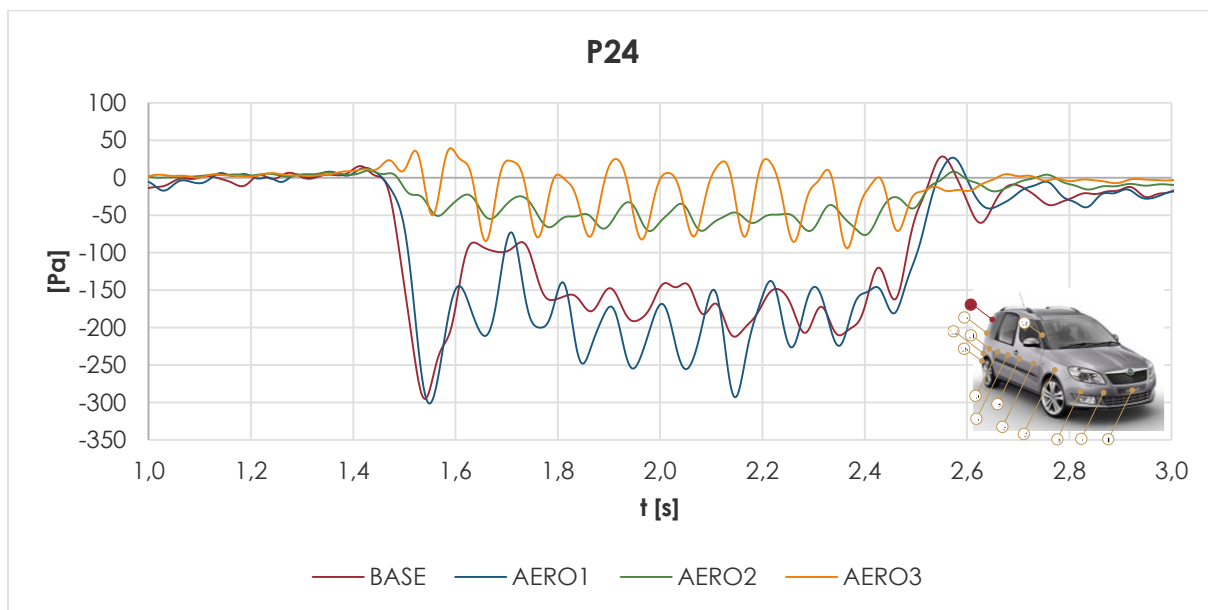
Na základě těchto měření jsou získány informace popisující souvislost mezi změnou tlaku na povrchu vozidla způsobenou aerodynamickými prvky úprav AERO1, AERO2 a AERO3 a změnou průběhu rychlosti stáčení. Dle očekávání se úprava AERO1 projevuje především v přední části vozu a na A-sloupcích, naopak varianty AERO2 a AERO3 se projevují především na zádi vozu. Tvrzení týkající se

úprav AERO2 a AERO3 reprezentují tlaky P10, P11, P12 a P13 na závětrné straně vozidla a P22, P23, P24 a P25 na návětrné straně vozidla. Porovnání průběhu tlaků P11 a P23 pro jednotlivé varianty je v Graf 3 a Graf 4.

Z uvedených grafů je patrný značný pokles tlaku na návětrné straně pro varianty AERO1 a BASE, současně na závětrné straně dochází k nárůstu tlaku. To znamená, že dochází k navýšení momentu stáčení a vozidlo je tudíž více citlivé na boční vítr. Naopak v případě varianty AERO2 dochází k menšímu poklesu tlaku, u AERO3 dokonce nárůstu tlaku na návětrné straně a poklesu na závětrné straně. V tomto případě je výsledný moment menší a vozidlo je méně citlivé na boční vítr. Uvedené závěry jsou silnější s výškovou polohou odběrného místa, jinými slovy geometrické úpravy AERO2 a AERO3 fungují lépe blíže střechy karoserie než u zadního nárazníku. To je patrné z Graf 5 a Graf 6.



Graf 5 Průběh tlaku v bodě 12 - na závětrné straně



Graf 6 Průběh tlaku v bodě 24 - na návětrné straně

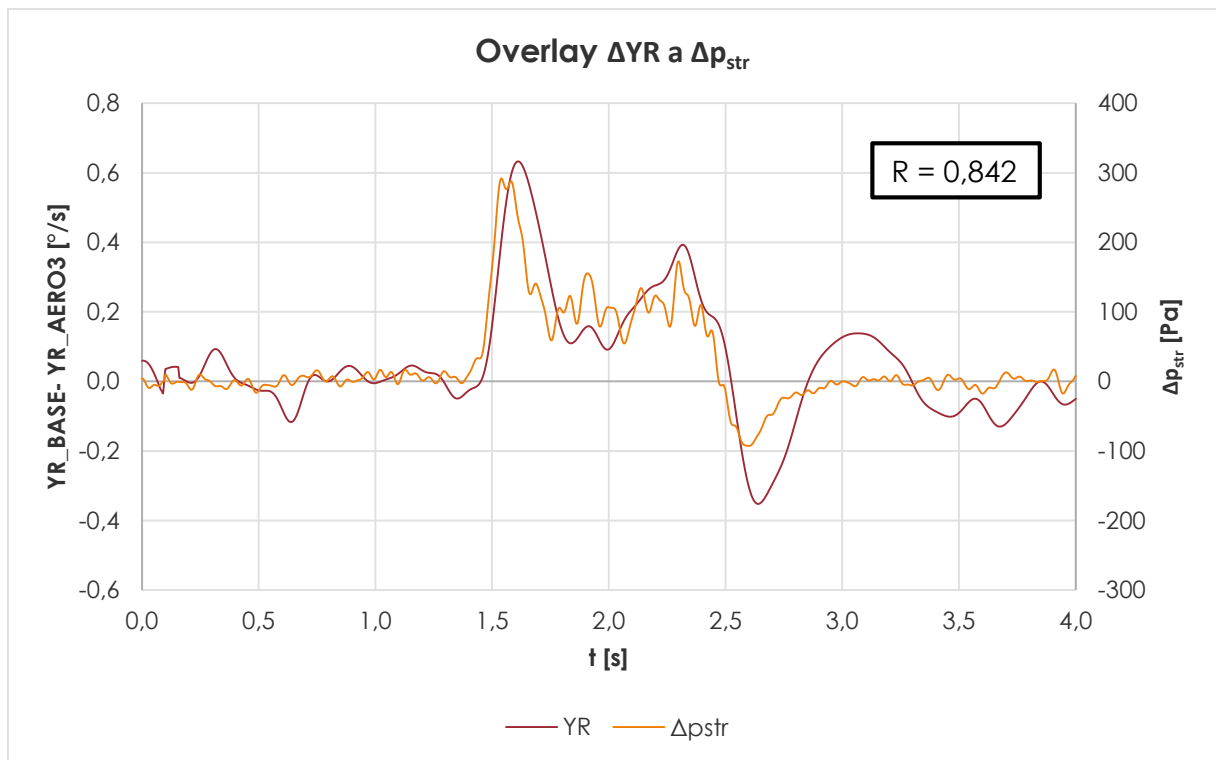
Z výše popsaných závěrů je patrné, že nejlépe lze řídit CBV vhodnými úpravami na zádi vozu. Pokud toto platí, musí existovat i vazba mezi rozdílem tlaků a rychlosti stáčení jednotlivých variant BASE a například AERO3. Střední rozdíl tlaku na zádi vozu Δp_{str} mezi variantami je definován rovnicí (19).

$$\Delta p_{str} = \Delta p_{str}^{Návětrná} - \Delta p_{str}^{Závětrná}$$

$$\Delta p_{str}^{Závětrná} = \frac{\sum_{i=10}^{13} (p_i^{BASE} - p_i^{AERO3})}{4}$$

$$\Delta p_{str}^{Návětrná} = \frac{\sum_{i=21}^{24} (p_i^{BASE} - p_i^{AERO3})}{4}$$
(19)

Rozdíl stáčivé rychlosti vybraných variant poté odpovídá $YR_BASE - YR_AERO3$. Ukázka překrytí rozdílu stáčivé rychlosti a středního tlaku na zádi vozidla je uvedena v Graf 7.



Graf 7 Overlay ΔYR a Δp_{str} variant BASE a AERO3

Výše uvedené porovnání potvrzuje přímou vazbu mezi tlakem na povrchu vozidla na zádi vozu a rychlosti stáčení, tedy citlivostí vozidla na boční vítr. Pro snížení CBV je vhodné opatřit zadní část vozidla odtrhovými hranami, nebo ještě lépe aerodynamickými prvky podobným ve variantách AERO2 a AERO3.

10 ZÁVĚR

Citlivost vozidla na boční vítr je oblast jízdní stability, která je v případě osobních vozidel nejvíce závislá na aerodynamice vozidla. Přestože je tato oblast na při vývoji vozidla minoritní, z dlouhodobého hlediska zvyšování bezpečnosti a jízdního komfortu se stává čím dál tím významnější. V případě luxusních vozů s řízením toku momentu (brzdného či hnacího) na jednotlivá kola je možné využít pokročilých elektronických systémů, jako například Mercedes Crosswind Assist. Tento způsob řešení lze považovat za aktivní řešení vzniklé situace při působení bočního větru. Druhou možností, která je oproti asistenčním systémům ekonomicky efektivnější, je vlastní snížení citlivosti vozidla na boční vítr vhodným tvarem karoserie. K tomu je vhodné vytvořit výpočtový nástroj s příslušnou metodikou hodnocení citlivosti vozidla na boční vítr.

Cílem této práce bylo vytvoření metodiky a výpočetního nástroje pro hodnocení CBV. Samotný výpočetní nástroj je postaven na modelu vozidla se dvěma stupni volnosti, viz Obr. 2, doplněným o model aerodynamických sil. Samotné hodnocení vozidla vychází z normy ISO 12021, sledujíc se tedy střední integrální hodnoty momentu stáčení a očního zrychlení, popř. vybočení vozidla v daném čase. Model je sestaven v sw. Matlab a kromě samotných integrálních kritérií jsou výstupy i časové průběhy stavových veličin popisující jízdní dynamiku vozidla.

Samotnou oblastí metodiky hodnocení CBV je zajištění vhodných vstupů do výpočtového modelu, které lze rozdělit na aerodynamické, hmotové a parametry pneumatiky. Aerodynamické parametry vozidla jsou získány měřením v aerodynamickém tunelu, důležité jsou především koeficienty boční síly a stáčivého momentu. Získání hmotnostních parametrů, jako jsou hmotnost vozidla a poloha těžiště v rovině XY, je naprosto triviální, obtížnější je získání momentu setrvačnosti vozidla k ose Z. K tomuto je možné využít měřicí stolici. V případě parametrů pneumatiky pracuje simulační model s modelem pneumatiky Magic Pacejka MF5.2. Parametry pro tento model je možné získat pouze experimentem na měřicím stavu.

Na základě sestaveného matematického modelu byla v rámci této práce provedena pokročilá citlivostní analýza sledovaných kritérií na jednotlivé vstupní parametry. Tady citlivostní studia je provedena prostřednictvím Response Surface Method s patnácti vstupními parametry. Z výsledků této citlivostní studie lze prohlásit za významné parametry rychlost a směr větru, aerodynamický koeficient momentu stáčení a čelní plochu vozidla. Důležité jsou také celková hmotnost, poloha těžiště vozidla a gradient směrového koeficientu pneumatiky. Téměř zanedbatelné jsou pro hodnocení CBV vztlaky. Na základě této analýzy byla vypočtena chyba modelu způsobená chybou vstupů, která činí 4,8%, což je s ohledem na daný počet vstupů vyhovující.

Jako každá jiná oblast zabývající se výpočetními modely, byla i metodika hodnocení CBV validována technickým experimentem. Experimentální vozidlo vycházelo z modelu Škoda Roomster, který byl opatřený třemi měřicími systémy pro záznam dat popisujících jízdní dynamiku vozidla, měření silových účinků ve stopě pneumatiky všech čtyř kol a měření tlaku na povrchu karoserie. Měření bylo provedeno pro celkem 12 variant vozidla, kde 4 z nich obsahovaly aerodynamické úpravy tvaru vozidla s cílem řídit CBV. Měření proběhlo na polygonu Applus IDIADA ve Španělsku dle ISO 12021. Samotná střední odchylka modelu od experimentu nepřesáhla 9%.

Na základě měření tlaků na povrchu vozidla se současným měřením stáčivé rychlosti byla získána přímá souvislost mezi změnou tlaku na zádi vozidla a změnou stáčivé rychlosti pro jednotlivé aerodynamické varianty, viz Graf 7. Ze získané vazby mezi změnou tlakového pole a průběhem rychlosti stáčení lze doporučit osadit zadní část vozidla odtrhovými hranami nebo aerodynamickými prvky podobným úpravám AERO2 a AERO3. Podobné úpravy je možné spatřit na pátých dveřích vozidla Mercedes A, model 2013.

Jako možným pokračováním této práce by bylo vhodné nahradit vstupy získané měřeními v aerodynamickém tunelu výstupem z nestacionární CFD simulace, čímž by došlo k přímému propojení CFD s modelem jízdní dynamiky. Další zajímavá oblast, která se jeví jako vhodná k rozvinutí, je rozsáhlé měření tlaků na povrchu vozidla s cílem získat tlakové pole a přímo určit síly a momenty od aerodynamických účinků v bočním větru. Takto naměřené aerodynamické síly by pak bylo možné porovnat se stavovými veličinami jízdní dynamiky vozidla a na základě tohoto srovnání by bylo možné vytvořit podrobnější model popisující vztah mezi pohybem vozidla a nestacionárními aerodynamickými silovými účinky.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HUCHO, Wolf-Heinrich. *Aerodynamics of road Vehicles*. 4 ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998, 918 s. ISBN 0-7680-0029-7.
- [2] PACEJKA, Hans B. *Tyre and vehicle dynamics*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006, 642 s. ISBN 0-7506-6918-7.
- [3] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel* /. vyd. 2. Brno: Prof.Ing.František Vlk,DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 432 s.
- [4] ISO 12021:2010. *Road vehicles -- Sensitivity to lateral wind -- Open-loop test method using wind generator input*. Genève: International Organization for Standardization, 2010.
- [5] ISO 8855:2011. *Road vehicles -- Vehicle dynamics and road-holding ability – Vocabulary*. Genève: International Organization for Standardization, 2011.
- [6] RUIZ, S.; CATALA, A.; PUNSET, A.; ARBIOL, J.; MARI, R. *Multi Body System – Computational Fluid Dynamics (CFD) integration*, 1st MSC ADAMS European User's Conference, London, 2002
- [7] ZENS, Kentaro. *CFD Simulations for the Analysis of Cross-wind Sensitivity of Passenger Cars*, AUDI AG
- [8] TSUBOKURA, M.; NAKASHIMA, T.; NOUZAWA, T.; NAKAMURA, T.; KITO, K.; ZHANG, H.; HORI, K.; OSHIMA, N.; KOBAYASHI, T.; *Numerical prediction of Unsteady Aerodynamic Forces on Road Vehicles Using High Performance LES*, Abstract for presentation at FISITA 2008 Conference, Japan, 2008
- [9] KOBAYASHI, N.; YAMADA, M. *Stability of One Box Type Vehicle in a Cross-Wind – An Analysis of Transient Aerodynamic Forces and Moments*, SAE paper 881878, 1988
- [10] ASCHWADEN, P.; MÜLLER, J.; TRAVAGLIO, G-C.; SCHÖNING, T.; *The Influence of Motion Aerodynamics on the Simulation of Vehicle Dynamics*, SAE paper 2008-01-0657, 2008.
- [11] TSUBOKURA, M.; NAKASHIMA, N.; KITAYAMA, M.; IKAWA, Y.; DOH, D-H.; KOBAYASHI, T.; *Large eddy simulation on the unsteady aerodynamic response of a road vehicle in transient crosswinds*, International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009
- [12] ČAVOJ, Ondřej. *Výpočet aerodynamických charakteristik vozidla s vybočením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[N]	Aerodynamický vztlak v AT
AT	-	Aerodynamický tunel
A_y	$[m \cdot s^{-2}]$	Boční zrychlení
$C_{1..C_4}$	$[N \cdot m^{-1}]$	Tuhost pružin stavu měření momentu setrvačnosti
CBV	-	Citlivost vozidel na boční vítr
CC_k	$[N \cdot rad^{-1}]$	Gradient směrového koeficientu
CC_α	$[rad^{-1}]$	Směrový koeficient
CG	-	Těžiště vozidla
CP	-	Střed tlakových sil
C_s	[-]	Součinitel aerodynamické boční síly
C_s	$[N \cdot rad^{-1}]$	Tuhost řízení
C_{sv}, C_{sh}	[-]	Součinitel aerodynamické boční síly kol přední, zadní nápravy
C_w	[-]	Součinitel aerodynamického odporu
C_α	$[N \cdot rad^{-1}]$	Směrová tuhost pneumatiky
$d^2\psi/dt^2$	$[rad \cdot s^{-2}]$	Stáčivé zrychlení
d^{AeroIn}	[-]	Koeficient strmosti nárůstu aerodynamických sil
$d^{AeroOut}$	[-]	Koeficient strmosti poklesu aerodynamických sil
$d\psi/dt$	$[rad \cdot s^{-1}]$	Rychlost stáčení
e	[m]	Aerodynamické rameno
F	$[m^2]$	Čelní plocha vozidla
F_X^{Aero}	[N]	Aerodynamická odporová síla
F_{XTf}, F_{XTr}	[N]	Podélné síly ve stopě pneumatiky předních, zadních kol
F_Y^{Aero}	[N]	Aerodynamická boční síla
F_{YTf}, F_{YTr}	[N]	Příčné síly ve stopě pneumatiky předních, zadních kol
F_Z^{Aero}	[N]	Aerodynamická vztlaková síla
F_{ZTf}, F_{ZTr}	[N]	Svislé síly ve stopě pneumatiky předních, zadních kol
i_s	[-]	Převod řízení
I_z	$[kg \cdot m^2]$	Moment setrvačnosti vozidla k ose Z
L	[N]	Aerodynamický moment klopení v AT
l	[m]	Rozvor kol
l_f	[m]	Vzdálenost těžiště od přední nápravy
l_r	[m]	Vzdálenost těžiště od zadní nápravy
M	[N]	Aerodynamický moment klonění v AT
m	[kg]	Hmotnost vozidla
M_X^{Aero}	[Nm]	Aerodynamický moment klopení
M_{XT}	[Nm]	Klopný moment na kole
M_Y^{Aero}	[Nm]	Aerodynamický moment klonění
M_{YT}	[Nm]	Moment valivého odporu
M_Z^{Aero}	[Nm]	Aerodynamický moment stáčení
M_{ZT}	[Nm]	Vratný moment
N	[N]	Aerodynamický moment stáčení v AT
n_k	[m]	Konstrukční závlek
n_t	[m]	Závlek pneumatiky
PV_AY	$[m \cdot s^{-2}]$	Střední integrální hodnota bočního zrychlení

PV_YR	[rad·s ⁻¹]	Střední integrální hodnota rychlosti stáčení
q _∞	[Pa]	Dynamický tlak v tunelu
S	[N]	Aerodynamická boční síla v AT
T _c	[s]	Perioda kmitu celku (plošina + vozidlo)
T _p	[s]	Perioda kmitu plošiny
v	[m·s ⁻¹]	Rychlost vozidla
v _{res}	[m·s ⁻¹]	Rychlost výsledného proudu vzduchu
v _{WIND}	[m·s ⁻¹]	Rychlost proudění v aerodynamickém tunelu
v _x	[m·s ⁻¹]	Podélná rychlost vozidla
v _y	[m·s ⁻¹]	Příčná rychlost vozidla
W	[N]	Aerodynamický odpor v AT
w	[m·s ⁻¹]	Rychlost větru
x _{CG}	[m]	Vzdálenost těžiště od poloviny rozvoru
x _{CG} ^{rel}	[-]	Relativní vzdálenost těžiště od poloviny rozvoru
γ	[m]	Vybočení vozidla
γ _{CG}	[m]	Vzdálenost těžiště od roviny symetrie vozidla
α	[rad]	Směrová úchylka na kole
β	[rad]	Směrové úchylka v těžišti vozidla
γ	[rad]	Odklon kola
δ _f , δ _r	[rad]	Úhel rejdu předních, zadních kol
δ _H	[rad]	Úhel natočení volantů
θ	[rad]	Úhel klonění
κ	[rad]	Podélný skluz kola
μ	[rad]	Úhel vektoru výsledného proudu vzduchu
τ	[rad]	Úhel náběhu větru
φ	[rad]	Úhel klopení
ψ	[rad]	Úhel stáčení